

Niko Eteläniemi ja Olli Siivola

## **TILA-AKUSTIIKAN SUUNNITTELUSSA KESKEISET AKUSTISET SUUREET**

# **TILA-AKUSTIIKAN SUUNNITTELUSSA KESKEISET AKUSTISET SUUREET**

Niko Eteläniemi, Olli Siivola  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, laite- ja tuotesuunnittelu

---

Tekijät: Niko Eteläniemi ja Olli Siivola

Opinnäytetyön nimi: Tila-akustiikan suunnittelussa kiinnostavat akustiset suureet

Työn ohjaajat: Kari Jyrkkä OAMK, Juha Nikula Qlu Oy

Tammikuu 2018

Sivumäärä: 24

---

Työn aiheena olivat tila-akustiikan suunnittelussa kiinnostavat akustiset suureet. Tavoitteena työssä oli selvittää akustiikan suunnittelijalle ja käyttäjälle keskeiset suureet sekä tutkia teoriaa ilmiöiden taustalla ja algoritmeja niiden mittaamiseen. Työn tavoitteissa painotettiin puheen ymmärrettävyyden mittaamista.

Keskeisten suureiden selvittämiseksi tehtiin opintomatka Genelec Oy:lle ja haastateltiin yrityksen asiantuntijaa. Haastattelun pohjalta työssä käsiteltyjen suureiden teoriaa ja algoritmeja tutkittiin useista alan julkaisuista ja standardeista.

Työn lopputuloksena saatiin selville tila-akustiikan suunnittelussa keskeiset akustiset suureet suunnittelijan ja käyttäjän näkökulmasta. Näiden suureiden taustalla vaikuttavaa teoriaa saatiin avattua ja annettua hyvä pohja mittaamisessa tarvittaville algoritmeille. Työ lyhentää huomattavasti teorian opiskeluun vaadittavaa aikaa, mikäli impulssivasteeseen perustuvaa STI-mittausta ruvetaan kehittämään Qlu Oy:llä.

---

Asiasanat: akustiikka, puheen ymmärrettävyys, akustiset suureet

## **ALKULAUSE**

Kiitämme Qlu Oy:tä siitä, että saimme yritykseltä kiinnostavan toimeksiannon tähän opinnäytetyöhön.

Haluamme myös kiittää Genelec Oy:n tutkimus- ja tuotekehitysjohtajaa Aki Mäkivirtaa rakentavasta ja hedelmällisestä keskustelusta 21.9.2017. Kiitoksemme annamme myös Tampereen teknillisen yliopiston tohtori Panu Maijalalle hänen antamastaan materiaalista ja neuvoista.

Erityisesti haluamme kiittää työmme ohjaajaa lehtori Kari Jyrkkää hyvästä ohjauksesta ja neuvoista työn aikana.

18.1.2018

Niko Eteläniemi ja Olli Siivola

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	6
1 JOHDANTO	8
2 AKUSTIIKKASUUNNITTELU	9
3 KESKEISET AKUSTISET SUUREET	10
3.1 Äänenpainetaso	10
3.2 Impulssivaste	11
3.3 Taajuusvaste	11
3.4 Fourier'n muunnos	12
3.5 STI	13
3.5.1 Suodatus	14
3.5.2 Puheen modulaatio	15
3.5.3 Modulaation siirtofunktio	15
3.5.4 MTF-arvojen käsittely	17
3.5.5 MTI-arvojen painotus	18
3.5.6 STI-arvon tulkinta	18
3.5.7 STIPA	19
4 TESTISIGNAALI SUUREIDEN MITTAAMISEEN	20
4.1 STI:n testisignaali	20
4.1.1 Suora menetelmä	20
4.1.2 Epäsuora menetelmä	20
4.1.3 Signaalin pituus	21
4.2 Testisignaali muille suureille	21
5 YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

## SANASTO

Desibeli	Äänenvoimakkuuden logaritminen yksikkö. Lyhenne dB.
DFT	Discrete Fourier Transform, diskreetti Fourier'n muunnos on diskreettiaikaista signaalia varten tehty Fourier'n muunnoksen muunnelma.
ENV	Temporal Amplitude Envelope, verhokäyrä, joka kuvaa ajallista amplitudin vaihtelua puhesignaalissa.
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier'n muunnos on tehokas algoritmi DFT:n laskemiseksi.
Hertsi	Taajuuden yksikkö. Hertsi ilmaisee, kuinka monesti värähdysjakso toistuu sekunnin aikana. Lyhenne Hz.
MATLAB	Numeeriseen laskentaan tarkoitettu tietokone ohjelmisto ja siinä käytettävä ohjelmointikieli.
MTF	Modulation Transfer Funktio, modulaation siirtofunktio kuvaa puheen modulation säilymistä systeemissä.
MTI	Modulation Transfer Index, modulaation siirtoindeksi on MTF-arvojen keskiarvo oktaavikaistalla.

Oktaavi	Sävelkorkeuden intervalli, joka ilmaisee taajuuden kaksinkertaistumista.
RIR	Room Impulse Response, huoneimpulssivaste.
STI	Speech Transmission Index, puheensiirtaindeksi kuvaa puheen ymmärrettävyyttä.
STIPA	Speech Transmission Index for Public Address Systems, kuulutusjärjestelmille suunnattu STI.
Taajuus	Ilmaisee toistuvan ilmiön tapahtumien määrää aikayksikköä kohden. Yksikkönä hertsi.
TFS	Temporal Fine Structure, puhesignaalin kantotaajuus.

# 1 JOHDANTO

On monia erilaisia tiloja erilaisine käyttötarkoituksineen, joissa akustiikka näyttelee enemmän tai vähemmän tärkeää roolia. Esimerkiksi konserttisaleissa akustiikalla pyritään luomaan mahdollisimman tarkka ja puhdas kuunteluympäristö. Oppimis- ja neuvottelutiloissa hyvä tila-akustiikka parantaa viihtyvyyttä ja puheen ymmärtämistä ja tukee tilan haluttua käyttötarkoitusta.

Koska fysiikan lait pätevät kaikkialla maailmassa, on tiettyjä akustisia suureita tarkastelemalla mahdollista arvioida kaiken tyyppisten tilojen akustista toimivuutta, riippumatta tilan käyttötarkoituksesta.

Tässä Qlu Oy:n toimeksiannosta tehdyssä opinnäytetyössä on pyritty selvittämään, mitkä ovat ne olennaiset suureet, joilla voidaan arvioida tilan akustiikan toimivuutta sille määritellyssä käyttötarkoituksessa. Opinnäytetyössä pyritään myös avaamaan teoriaa näiden suureiden mittaamiseen. Aihetta tarkastellaan toimeksiantajan toiveesta erityisesti mitauksen nopeuden näkökulmasta.

Monissa tiloissa, jotka on tarkoitettu erityisesti puhekäyttöön, kuten neuvottelu- ja konferenssitilat, puheen ymmärrettävyys on olennainen asia. Puheen ymmärrettävyyden mittaamiseen on standardoitu menetelmä, jonka tutkiminen oli toimeksiannossa keskeisessä roolissa.



## 2 AKUSTIIKKASUUNNITTELU

Akustiikka on parhaimmillaan silloin, kun ollaan täysin avonaisessa tilassa, jolloin kuulija saa vain suoran täysin puhtaan äänen. Kun äänen tielle tuodaan esteitä, kuten seiniä, ääni alkaa kimpoilla. Tästä aiheutuu erilaisia heijastuksia, kaikuja ja virheitä. Jotta kuuntelu tiloissa, joissa on seiniä kuulijan ja äänilähteen läheisyydessä, olisi mielekästä, on ruvettu akustoimaan tiloja.

Tilojen akustoimisessa pyritään hajottamaan ja vaimentamaan ääntä erilaisilla rakennuselementeillä. Esimerkiksi ääni voidaan hajottaa ns. diffuusoreilla, puolikaaren mallisilla levyillä, tai vaimentaa villaelementeillä.

Mihin nämä elementit pitäisi sijoittaa, jotta kuulokokemus olisi mahdollisimman hyvä? Mitä tilan akustiikalle tapahtuu, jos vaimennuselementti sijoitetaan tähän kohtaan juuri tähän asentoon? Nämä ovat kysymyksiä, joita subjektiivisten kuuntelukokemusten lisäksi voidaan objektiivisesti kartoittaa akustisilla mittauksilla.

### 3 KESKEISET AKUSTISET SUUREET

Opintomatalla Genelec Oy:ssä 21.9.2017 haastattelimme Aki Mäkipirtaa akustiikkaan liittyen. Tarkoituksena oli selvittää, millaisista akustisista suureista esimerkiksi konserttisalissa tai messutapahtumassa vieraileva asiakas olisi kiinnostunut. Haastattelussa selvisi, että akustisista mittauksista on hyötyä ennemminkin tilan suunnittelijalle, jotta hän kykenisi tuottamaan mahdollisimman hyvän kuunteluelämyksen asiakkaalle.

Haastattelussa tärkeimmiksi valikoituneita suureita, niiden määritelmää ja laskennan vaiheita selvitetään tässä luvussa. Toimeksiannossa näistä suureista nousi tärkeimmäksi puheensiirtoindeksi. Siksi kyseistä suuretta käsitellään muita suureita tarkemmin.

#### 3.1 Äänenpainetaso

Kuulemamme ääni on ilmanpaineen nopeaa vaihtelua, joka liikuttaa meidän korvasamme olevaa tärykalvoa. Tärykalvo värinä muuttuu hermoärsykkeeksi sisäkorvassa ja välittyy kuulohermion kautta aivojemme tulkittavaksi. Äänen sisältö muotoutuu paineen vaihtelun nopeudesta, ja äänen voimakkuus tulkitaan äänenpainetasosta. (1; 2.)

Äänenpainetaso  $L_p$  [dB] määritellään äänenpaineen ja vertailuäänipaineen suhteen seuraavasti (3).

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad \text{KAAVA 1}$$

missä  $p$  on äänenpaine pascaleina ja  $p_0$  on vertailuäänipaine. Vertailuäänipaineen standardisoitu arvo on

$$p_0 = 20 \mu Pa \quad \text{KAAVA 2}$$

Logaritmfunktion vaatima vertailuarvo on peräisin ihmisen kuulokynnyksestä. Keskitajuuksilla, 1 kHz:n tienoilla, nuoren normaalikuuloisen ihmisen kuulokynnys on suunnilleen 20  $\mu Pa$ :n kohdalla. (4.)

### 3.2 Impulssivaste

Yksikköimpulssivastefunktio (unit impulse response function), lyhyesti impulssivaste, on funktio, jonka sisältämä informaatio kertoo täydellisesti järjestelmän käyttäytymisestä ja vasteesta mille tahansa herätteelle (4).

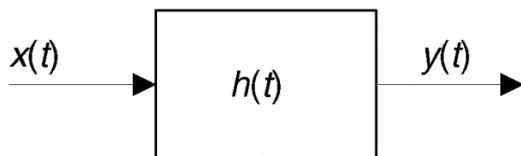
Impulssivaste saadaan, kun syötetään systeemin tuloon Diracin deltafunktio, eli äärettömän korkea ja kapea yksikköimpulssi, ja tarkastellaan saatua vastetta systeemin lähdössä (5).

Systeemin lähdössä näkyvä vaste  $y$  ajanhetkellä  $t$  lasketaan yhtälöllä

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

KAAVA 3

missä  $*$  symboli tarkoittaa konvoluutiota,  $x(t)$  on systeemin tulo käsiteltävänä ajanhetkenä ja  $h(t)$  on järjestelmän impulssivaste. (5) Kuvassa 1 selvennetään lohkokaaavion avulla yksikköimpulssivastefunktiota.



KUVA 1. Yksikköimpulssivastefunktion lohkokaavio.

Akustiikan mittauksessa yksikköimpulssivastefunktion systeeminä toimii mitattava tila. Kun tilaan syötetään yksikköimpulssia approksimoiva impulssi, kuten ilmapallon posaus, saadaan nauhoitettua systeemistä impulssivaste. Tästä impulssivasteesta voidaan laskea kaikki akustiikan analysoinnissa tarvittavat matemaattisesti todennettavat suureet. (6.)

### 3.3 Taajuusvaste

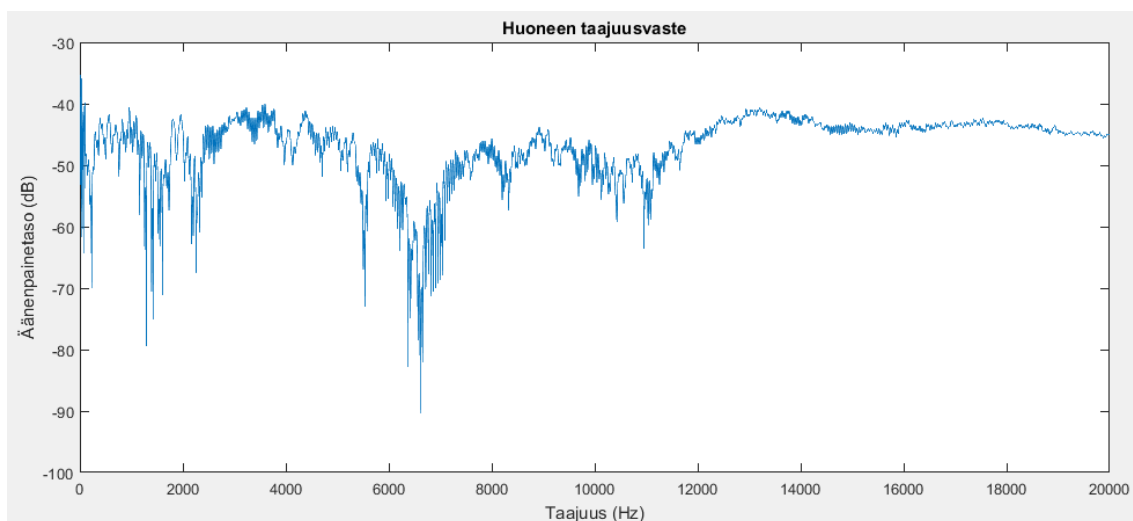
Taajuusvaste ilmaisee, miten tarkasti järjestelmä kykenee käsittelemään siihen syötetyn herätteen eri taajuuksilla. Akustisissa mittauksissa yleensä tarkastellaan huoneen, mikrofonin ja kaiuttimien taajuusvasteita. Tasainen taajuusvaste kaikilla ihmisen kuuloalueen

taajuuksilla on ideaalinen, sillä silloin syötetty heräte kuulostaa siltä kuin sen pitäisi, eikä siirtotie vahvista tai heikennä herätettä millään taajuudella.

Huoneen taajuusvaste kertoo, miten ympäröivä tila vaikuttaa akustiseen sointiin. Taajuusvaste kuvaajassa pystyakseli eli y-akseli ilmaisee äänenpaineen ja vaaka-akseli eli x-akseli ilmaisee taajuuden. Täysin tasainen taajuusvaste ei käytännössä ole kuitenkaan mahdollista, vaan se aina poikkeaa tasaisesta. (7, s. 25.)

Kuvassa 2 on Fourier-muunnoksen avulla tuotettu taajuusvastekuvaaja. Näytteenä on käytetty Aki Mäkipirralla saatua näytettä, jonka pohjalta tuleva puheensiirtoindeksi lasketaan.

Kuvaajasta voi huomata muutamia poikkeamia vakiotasosta. Taajuuksilla 200, 1 300, 2 200, 5 500, 6 600 ja 11 000 äänenpainetaso vaimenee. Puheenymmärrettävyyden kannalta taajuudet 125–8000 Hz ovat keskeisimpiä, joilla taajuusvasteen tulisi olla mahdollisimman tasainen. Taajuusvastetta voisi parantaa esimerkiksi tilan akustointia tai äänentoistojärjestelmää parantamalla.



*KUVA 2. Huoneen taajuusvaste*

### 3.4 Fourier'n muunnos

Fourier'n muunnos on jatkuva integraalimuunnos, jolla voidaan signaalinkäsittelyssä tehdä taajuusanalyysyjä. Digitaalisessa signaalinkäsittelyssä käsiteltävä signaali on näytteistetty jollakin näytteenottotaajuudella. Tällöin signaalista tulee diskreetti aikainen.

Diskreetti aikaisen signaalin taajuusanalyysiin on kehitetty muunnelma Fourier'n muunnoksesta, diskreetti Fourier'n muunnos (DFT). (8.)

Diskreetistä Fourier'n muunnoksesta on kehitetty tehokas algoritmi, FFT, jonka laskennallinen kompleksisuus on  $O(N \log N)$ , missä  $N$  on signaalin näytteiden lukumäärä. Diskreetissä Fourier'n muunnoksen laskeminen suoraan on raskasta, koska sen laskennallinen kompleksisuus on  $N^2$ . Nykyään lähes kaikista korkeatason ohjelmointikielistä löytyy valmis funktio FFT:n laskemiseen. (9.)

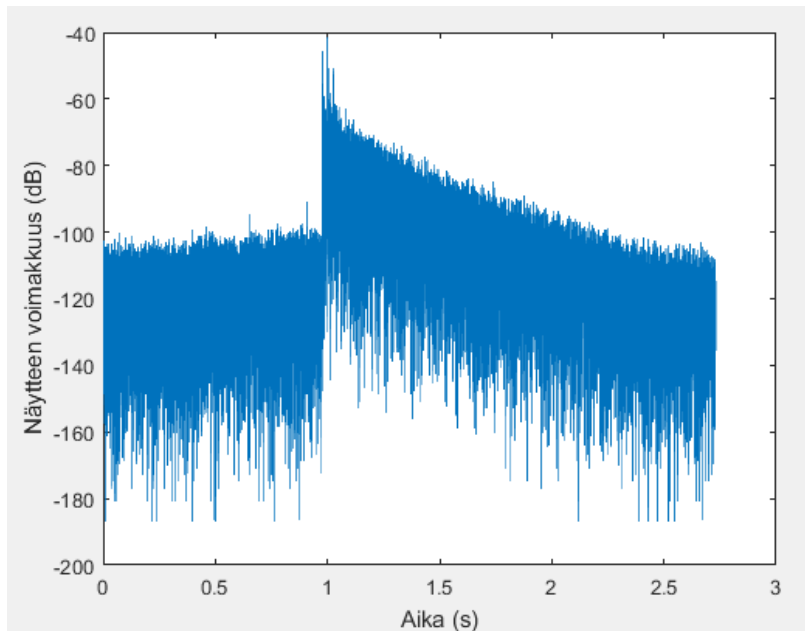
### 3.5 STI

Puheensiirtoindeksi eli STI (Speech Transmission Index) kuvaa puheen ymmärrettävyyttä tietyssä tilassa yhdellä numerolla.

STI-mittauksessa on mahdollista käyttää epäsuoraa tai suoraa menetelmää. Menetelmien olennaisin ero testisignaalisissa. Toimeksiannossa yhtenä lähtökohtana oli saada mitaus tehtyä mahdollisimman nopeasti. Siksi työssä käytetään huomattavasti nopeampaa, standardin IEC 60268-16 määrittelemää epäsuoraa menetelmää. (10.)

Epäsuoraa menetelmää käyttäen puheensiirtoindeksi eli STI on laskettavissa huoneen impulssivasteesta. Kuvassa 3 näkyy Aki Mäkirirralta saatu nauhoitettu huoneimpulssivasteen sisältö äänenpainetasona.

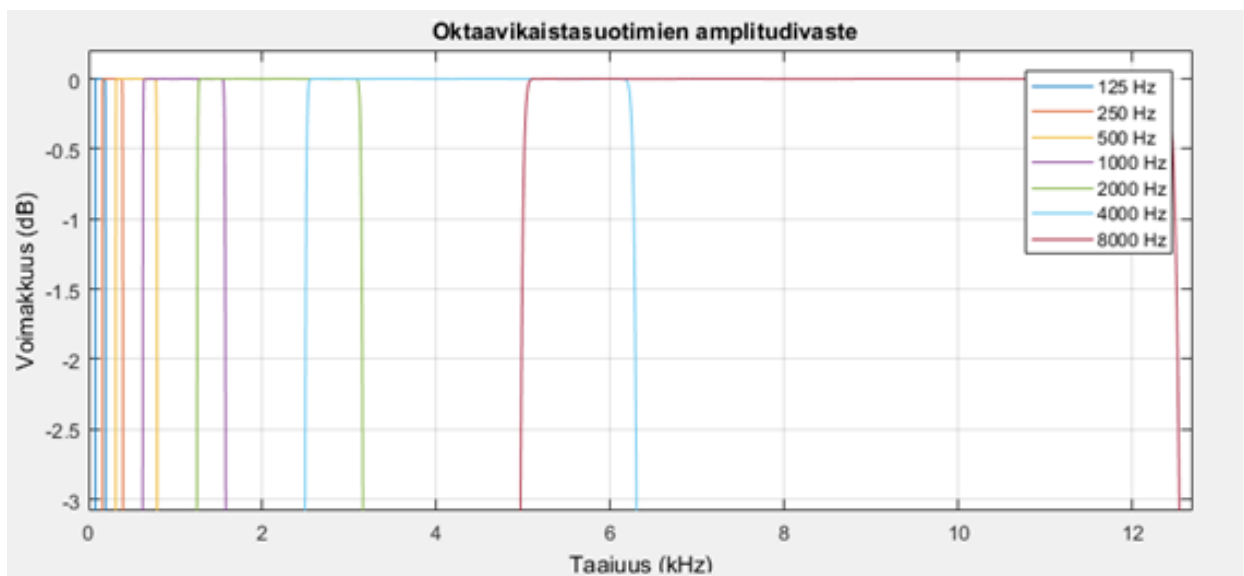
Sekuntiin asti kuvaajassa näkyy huoneen taustakohinaa, kunnes impulssi annetaan. Noin 1,5 sekunnin kuluttua impulssista äänenpainetaso on vakiintunut taustakohinan tasolle.



KUVA 3. Nauhoitettu huoneimpulssivaste desibeleinä

### 3.5.1 Suodatus

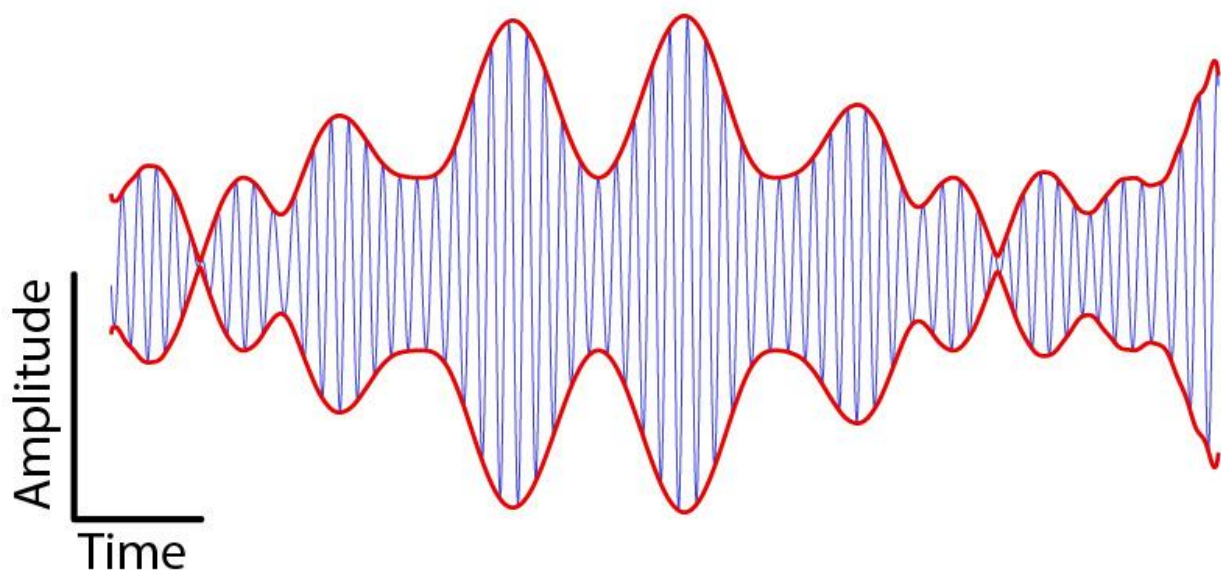
STI-arvon laskennassa tarkastellaan modulaatiotaajuuksien säilymistä seitsemällä eri oktaavikaistalla. Nauhoitettu huoneimpulssivaste jaetaan oktaavikaistoihin kaistanpäästösuoittimilla, joiden keskitaajuuudet ovat oktaavin välein taajuusalueella 125 Hz – 8000 Hz, joka on puheinformaation kannalta olennainen taajuusalue. (10, s. 16.) Kuva 4 selventää, miltä MATLABilla generoidut kaistanpäästösuoittimet näyttävät.



KUVA 4. Oktaavikaistasuotimien amplitudivaste

### 3.5.2 Puheen modulaatio

Puhe koostuu monista akustisista ominaisuuksista, kuten formanttitaajuuksista, ajallisesta tehon vaihtelusta ja jaksotuksesta. On kuitenkin havaittu, että puheen ymmärrettävyyden kannalta puheen ajallisella amplitudi-informaatiolla on suuri merkitys. Amplitudi-informaatio koostuu ajallisesta hienorakenteesta (Temporal Fine Structure, TFS), eli puheen kantotaajuudesta (ts. äänenkorkeudesta), sekä ymmärrettävyyden kannalta merkityksellisemmästä ajallisesta amplitudiverhokäyrästä (Temporal Amplitude Envelope, ENV). (11; 12.)



KUVA 5. Puhesignaalia. TFS-signaali on merkitty sinisellä ja ENV-käyrä punaisella. (13.)

Ajallinen amplitudiverhokäyrä kuvaa puheen kantotaajuuden amplitudin muutosta ajan funktiona ja se on summa useista matalista taajuuksista väliltä 0,1–24 Hz. Niitä kutsutaan modulaatiotaajuuksiksi. Matalilla modulaatiotaajuuksilla, etenkin alle 16 Hz, on ratkaiseva rooli puheen ymmärrettävyydessä. On kuitenkin todettu, että taajuudet 0,63–12,5 Hz riittävät puheen ymmärrettävyyden mittaamiseen. (14; 12.)

### 3.5.3 Modulaation siirtofunktio

Puheensiirtoindeksi perustuu modulaation siirtofunktion (Modulation Transfer Function, MTF) laskemiseen, joka esittää modulaation säilymistä systeemissä (kuva 6). STI:n las-

kennassa MTF esittää ympäröivän tilan vaikutusta puheen modulaatioon kullakin oktaavikaistalla. MTF siis kertoo, kuinka paljon tilan meluisuus ja kaikuisuus huonontavat modulaatiota. (15; 11.)



KUVA 6. Taustakohina, heijastukset ja kaiku huonontavat puheen modulaatiota. (15.)

STI-mittaus ottaa huomioon neljatoista modulaatiotaajuutta seitsemällä oktaavikaistalla. Näin ollen saadaan 98 MTF-arvoa. Modulaatiotaajuuudet ovat taajuusalueelta 0,63–12,5 Hz otettuna 1/3-oktaavin välein. Kuvassa 7 selvennetään modulaatiotaajuuksien ja oktaavikaistojen suhdetta STI-mittauksessa. (15.)

		Modulation Frequencies													
		0.63 Hz	0.8 Hz	1 Hz	1.25 Hz	1.6 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3.15 Hz	4 Hz	5 Hz	6,3 Hz	8 Hz	10 Hz	12.5 Hz
Octave Bands	125 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	250 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	500 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	4 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	8 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

KUVA 7. STI-mittauksen modulaatiotaajuuudet oktaavikaistoittain (15)

Modulaation siirtofunktio modulaatiotaajuudelle  $f_m$  oktaavikaistalla  $k$  saadaan kaavalla

$$m_k(f_m) = \frac{\left| \int_0^\infty h_k(t)^2 e^{-j2\pi f_m t} dt \right|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \quad \text{KAAVA 4}$$

missä  $h_k(t)$  on impulssivaste oktaavikaistalta  $k$ , ajanhetkellä  $t$

$f_m$  on modulaatiotaajuus 0,63 Hz – 12,5 Hz

Kaavassa jakoviivan yläpuolella lasketaan FFT:n eli nopean Fourier'n muunnoksen avulla, kuinka paljon käsiteltävää modulaatiotaajuutta esiintyy neliöidyssä oktaavikaistasuodatetussa signaalissa, eli signaalin amplitudi verhokäyrässä (ENV). FFT:n tuloksena



on käsiteltävän taajuuden voimakkuus ja sen itseisarvo jaetaan signaalin kokonaisenergialla. Kokonaisenergia lasketaan integroimalla impulssivasteen neliötä. (10.)

Tietokoneohjelmissa MTF-arvojen laskeminen voidaan toteuttaa seuraavalla algoritmilla:

1. Neliöidään kaikki oktaavikaistasuodatetun signaalin näytteet.
2. Lasketaan kokonaisenergia oktaavilla, summaamalla kaikkien signaalin näytteiden voimakkuudet.
3. Lasketaan FFT:n avulla, kuinka paljon kutakin modulaatiotaajuutta esiintyy neliöidyssä oktaavikaistasuodatetussa signaalissa.
4. Normalisoidaan modulaatiotaajuuden voimakkuus jakamalla se kokonaisenergialla.

### 3.5.4 MTF-arvojen käsittely

STI-algoritmissa MTF-arvoista pitää laskea signaali-kohinasuhde (Signal Noise Ratio, SNR), ja se tulee rajoittaa +/-15 dB:iin muuttamalla rajat ylittävät SNR-arvot vastaamaan raja-arvoja. SNR voidaan laskea kaavalla

$$SNR_{\text{eff } k, f_m} = 10 \times \log \left( \frac{m_{k, f_m}}{1 - m_{k, f_m}} \right) \quad \text{KAAVA 5}$$

missä  $m_{k, f_m}$  on MTF-arvo oktaavikaistalla  $k$  ja modulaatiotaajuudella  $f_m$ . Rajoitettu SNR-arvo skaalataan siirtoindeksiksi (Transmission Index, TI) kaavalla

$$TI_{k, f_m} = \frac{SNR_{\text{eff } k, f_m} + 15}{30} \quad \text{KAAVA 6}$$

missä  $SNR_{\text{eff } k, f_m}$  on signaali-kohinasuhde oktaavikaistalla  $k$  ja modulaatiotaajuudella  $f_m$  ilmaistuna desibeleinä. Näin saadut siirtoindeksien arvot ovat välillä 0 – 1. (10.)

Puheensiirtoindeksiä (STI) varten lasketaan modulaationsiirtoindeksi (Modulation Transform Index, MTI) jokaiselta oktaavikaistalta aritmeettisella keskiarvolla

$$MTI_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n TI_{k, f_m} \quad \text{KAAVA 7}$$

missä  $TI_{k, f_m}$  on siirtoindeksi oktaavikaistalla  $k$  ja modulaatiotaajuudella  $f_m$

$m$  on modulaatiotaajuuden indeksi

$n$  on modulaatiotaajuuksien määrä oktaavikaistalla (10).

### 3.5.5 MTI-arvojen painotus

Lopullinen puheensiirtoindeksi lasketaan kaavan 8 mukaisesti modulaationsiirtoindeksien painotettuna summana (10). Taulukossa 1 on esitetty painokertoimet.

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \times MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \times \sqrt{MTI_k \times MTI_{k+1}} \quad \text{KAAVA 8}$$

missä  $MTI_k$  on modulaationsiirtoindeksi oktaavikaistalla  $k$

$\alpha_k$  on painokerroin oktaavikaistalle  $k$

$\beta_k$  on redudanssikerroin oktaavikaistan  $k$  ja  $k + 1$  välissä

Kaava antaa STI-arvon yhtenä lukuna arvoasteikolla 0–1.

TAULUKKO 1. Standardin IEC 60268-16 mukaiset painokertoimet (10.)

Octave band Hz		125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Males	$\alpha$	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	$\beta$	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	–
Females	$\alpha$	–	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	$\beta$	–	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	–

### 3.5.6 STI-arvon tulkinta

STI-arvot nollan tuntumassa tarkoittavat huonoa puheen ymmärrettävyyttä, ja STI-arvot asteikon loppupäässä tarkoittavat erinomaista puheenymmärrettävyyttä. STI-arvojen lukuarvo on suhteutettuna sanalliseen arvosteluun kuvassa 8.



KUVA 8. STI-asteikko (16.)

### 3.5.7 STIPA

Puheensiirtoindeksi kuulutusjärjestelmälle eli STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems) on STI-mittauksen johdannainen. STIPA-mittaus ottaa huomioon jokaiselta seitsemältä oktaavikaistalta vain kaksi modulaatiotaajuutta. Tästä syystä STIPA-mittaus on huomattavasti STI-mittaukseen kevyempi operaatio, koska sillä päädytään 14 modulaatioindeksiin 98 indeksin sijaan. Kuvassa 9 on IEC 60268-16:2011 -standardin määrittelemät STIPA-mittauksen mitattavat modulaatioindeksit. (15.)

STIPA-mittauksen laskennan keveys ei kuitenkaan ole enää merkittävä tietokoneiden suuren laskentatehon ansiosta. On siis suositeltavampaa käyttää tarkempaa STI-mittausta. (6.)

		Modulation Frequencies													
		0.63 Hz	0.8 Hz	1 Hz	1.25 Hz	1.6 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3.15 Hz	4 Hz	5 Hz	6,3 Hz	8 Hz	10 Hz	12.5 Hz
Octave Bands	125 Hz					✓							✓		
	250 Hz			✓							✓				
	500 Hz	✓							✓						
	1 kHz						✓							✓	
	2 kHz				✓							✓			
	4 kHz		✓							✓					
	8 kHz							✓							✓

KUVA 9. IEC60268-16:2011 -standardin määrittelemät STIPA-mittauksessa laskettavat modulaatioindeksit (15.)

## 4 TESTISIGNAALI SUUREIDEN MITTAAMISEEN

Testisignaaliilla tarkoitetaan digitaalisesti tai akustisesti toistettavaa ääntä, jonka pohjalta akustisia suureita lasketaan. Tässä luvussa selvennetään testisignaalin vaatimuksia puheensiirtoindeksin laskennan eri menetelmille.

### 4.1 STI:n testisignaali

Puheensiirtoindeksi (STI) on käytetyin objektiivinen mittari puheen ymmärrettävyyden arvioimiseksi. Kaikki mittauksiin ja datan käsittelyyn liittyvät ohjeet annetaan kansainvälisen sähköalan standardointiorganisaation (IEC) standardissa IEC 60268-16. Kyseinen standardi on korjattu neljästi: vuosina 1988, 1998, 2003 ja 2011. Uusimmassa standardin versiossa STI:n laskennassa suositeltavien menetelmien listalle, suoran menetelmä rinnalle, on lisätty epäsuora menetelmä. (17, s. 1.)

Vuonna 2014 ICSV:ssä (International Congress on Sound and Vibration) julkaistu tutkimus totesi epäsuoran ja suoran menetelmän tuottavan tuloksia, jotka eivät merkityksellisesti eroa toisistaan (17, s. 7).

#### 4.1.1 Suora menetelmä

Suora menetelmä STI:lle hyödyntää moduloituja testisignaaleja. Jokainen testisignaali sisältää yhden modulaatiotaajuuden yhdelle oktaavikaistalle. Muilla oktaavikaistoilla ei esiinny testisignaaleja yhtä aikaa. Jokainen testisignaali kestää n. 10 sekuntia. Täyden STI:n mittaus, joka ottaa huomioon kaikki 98 modulaatioindeksiä, kestää siis n. 15 minuuttia. (10, s. 25.)

#### 4.1.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuora menetelmä käyttää hyväkseen impulssivasteesta laskettua modulaation siirtofunktiota. Tietotekniikan laskentakapasiteetin nousun johdosta epäsuora menetelmä on huomattavasti nopeampi toteuttaa kuin suora menetelmä.

Menetelmässä voi käyttää mitä tahansa signaalia, josta on laskennallisesti saatavissa huoneen impulssivaste. Signaaleista yleisimpiä ovat sini sweep ja yksikköimpulssia approksimoiva impulssi, joista jälkimmäinen on nopeampi. (6.)

### **4.1.3 Signaalin pituus**

Impulssivasteen pituus on määritelty IEC 60268-16 -standardissa. Standardin mukaan impulssivasteen pituus ei saa olla alle puolet jälkikaiunta-ajasta, mutta sen kuitenkin tulee olla vähintään 1,6 sekuntia. Näin varmistetaan matalimman modulaatiotaajuuden 0,63 Hz:n modulaatioindeksien luotettavuus. (10, s. 34.)

### **4.2 Testisignaali muille suureille**

Huoneimpulssivaste (RIR) kuvaa täydellisesti tilan akustisia ominaisuuksia. Ei ole väliä, mitä signaalia käytetään impulssivasteen hankkimiseen, sillä tuloksen pitäisi olla sama kuin muilla, mikäli laskenta algoritmi on kunnossa. (6.)

Toimeksiannossa painotettiin mittauksen nopeuden merkitystä. Tästä syystä työhön on valittu testisignaalksi yksikköimpulssia approksimoiva signaali, joka on nopein testisignaali, mikä antaa mahdollisuuden nauhoittaa impulssivasteen tilasta ilman lisälaskentaa. Vastaavan testisignaalin avulla nauhoitettu impulssivaste löytyy kuvasta 3. Kyseinen näyte on saatu Aki Mäkirralta.

## 5 YHTEENVETO

Toimeksiantomme mukaisesti tarkoituksenamme oli selvittää keskeisimmät akustiset suureet erilaisissa kuuntelutiloissa, niin asiakkaan kuin tilan omistajan kannalta.

Saimme hyvät lähtökohdat opinnäytetyölle Genelec Oy:n tiloissa järjestetyn haastattelun aikana. Aki Mäktivirran haastattelu auttoi rajaamaan erittäin laajaa akustista tieteenalaa, jonka johdosta pystyimme keskittymään oleelliseen.

Erityisesti puheensiirtoindeksin (STI) tutkiminen osoittautui työlääksi. Aiheesta löytyi suomeksi vain rajatusti tietoa, joka vaikeutti asiaan perehtymistä. Vieraskieliselle alan terminologialle löytyi suomenkielisiä käännöksiä vaihtelevasti, jonka seurauksena asiayhteyksiä piti etsiä muualtakin kuin akustiikan parista. Englanninkielistä materiaalia löytyi huomattavasti enemmän suomenkieliseen verrattuna, mutta niissä oman haasteensa antoi keskinäiset ristiriidat sekä puute puheenmodulaation selvityksessä. Aki Mäktivirran aineisto, STI-standardi ja keskustelut ohjaajamme lehtori Kari Jyrkän kanssa auttoivat selvittämään STI-menetelmän vaiheita.

Työssämme selvitimme epäsuoran menetelmän toimivuuden standardin ja muun aineiston pohjalta. Tästä johtuen ainut vaihtoehto ei ole tukeutua kaupallisiin ja huomattavasti hitaampiin suoran menetelmän laitteisiin, vaan on mahdollista rakentaa oma standardin mukainen impulssivasteeseen perustuva STI-mittalaite.

Työ antaa hyvän teoreettisen lähtökohdan akustisiin mittauksiin, ennen kaikkea STI:n mittaamiseen. Jotta todellinen mittalaite saataisiin tehtyä, tulisi työtä jatkokehittää. Seuraavana askeleena olisi vertailla erilaisia tapoja tuottaa impulssivaste. Tämän jälkeen tulisi arvioida haluttujen mittausten vaatimat laskentaoperaatiot, jonka perusteella voidaan alkaa suunnitella fyysistä mittalaitetta.

## LÄHTEET

1. Kuulo ja Kuulovammat. Kuuloliitto ry. Saatavissa: <https://www.kuuloliitto.fi/kuulo/kuulo-ja-kuulovammat/>. Hakupäivä 22.12.2017.
2. Äänen taajuus. Äänipää. Saatavissa: [http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuu\\_1.htm](http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuu_1.htm). Hakupäivä 22.12.2017.
3. Lemmetty, Sami. 2016. Teknistä akustiikkaa. Saatavissa: <http://pii-sami.net/tieto/akutek.htm>. Hakupäivä 29.9.2017.
4. Lahti, Tapio 1995. Akustinen mittaustekniikka, luennot 1995. Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.
5. Lyons, Richard G. 2011. Understanding digital signal processing. 2. painos. Lontoo: Pearson Education, inc.
6. Mäkivirta, Aki. 2017. R&D Director. Genelec. Haastattelu Genelecin tiloissa lisämessä 21.9.2017.
7. Suvela, Matti. 2010. Akustiikkaelementit – mihin niitä tarvitaan? Akustoinnin vaikutuksen selvittäminen UKKOstudion äänitarkkaamossa. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, musiikintuottaja. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/23718/Suvela\\_Matti.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/23718/Suvela_Matti.pdf?sequence=1). Hakupäivä 8.12.2017.
8. Fourier-menetelmät. Sähkömagneettiset aallot. Helsingin yliopisto. Saatavissa: [http://www.courses.physics.helsinki.fi/astro/havaitsevall/Radiomoniste/liite\\_b.pdf](http://www.courses.physics.helsinki.fi/astro/havaitsevall/Radiomoniste/liite_b.pdf). Hakupäivä 29.12.2017.
9. Arar, Steve. 2017. An Introduction to the Fast Fourier Transform. All About Circuits. Saatavissa: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-the-fast-fourier-transform/>. Hakupäivä 29.12.2017.
10. IEC 60268-16:2011. Sound system equipment part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. The British Standards Institution 2012. Saatavissa: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PublicPDFs/BS%20EN%2060268-16.pdf>. Hakupäivä 23.11.2017.
11. Unoki, Masashi. Study on important role of temporal amplitude-modulation feature of speech for auditory perceptio. School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology. Saatavissa:

- <http://www.jaist.ac.jp/hld/IntlSymp2016/paper/HLD2016-COM04.pdf>. Hakupäivä 20.12.2017.
12. Moon, Il Joon – Hong, Sung Hwa. 2014. What Is Temporal Fine Structure and Why Is It Important? Korean Journal of Audiology vol. 18, nro 1. S. 1–7. Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4003734/>. Hakupäivä 21.12.2017.
13. Brown, David. 2017. Think You're Bad at Math? Your Brain Does It Automatically! Saatavissa: [https://lh3.googleusercontent.com/JOPwPOc-a8VQp3ef-ZQpndlan2V\\_-bqkAu9IIQveXLWGn2bDDtQrPDx\\_sXPfuWExv3yEW7nvzyivqmgQxn8FJkfh11v\\_eNY8sdiRTxRAxMQhgUZUyohY-9PcrzLI2VMu49wxQO7ve](https://lh3.googleusercontent.com/JOPwPOc-a8VQp3ef-ZQpndlan2V_-bqkAu9IIQveXLWGn2bDDtQrPDx_sXPfuWExv3yEW7nvzyivqmgQxn8FJkfh11v_eNY8sdiRTxRAxMQhgUZUyohY-9PcrzLI2VMu49wxQO7ve). Hakupäivä 21.12.2017.
14. Mäkivirta, Aki. 2016. Speech Transmission Index (STI) Calculation. Genelec Oy.
15. Introducing Speech Intelligibility. 2002. NTi Audio. Saatavissa: <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/NTi-Audio-AppNote-AL1-Introducing-STIPA.pdf>. Hakupäivä 29.9.2017.
16. Intelligibility Conversion. Sengpielaudio. Saatavissa: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-ALcons-STI.htm>. Hakupäivä 29.12.2017.
17. Zhu, Mo, Kang. 2014. Experimental Comparison Between Direct and Indirect Measurement Methods for The Objective Rating of Speech Intelligibility. The 21st International Congress on Sound and Vibration. Saatavissa: [https://www.iiav.org/icsv21/content/papers/papers/full\\_paper\\_325\\_20140225070451775.pdf](https://www.iiav.org/icsv21/content/papers/papers/full_paper_325_20140225070451775.pdf). Hakupäivä 8.12.2017.